

# Die thermohaline Zirkulation des Atlantischen Ozeans in wirbelauflösenden Modellen

Claus W. Böning

## Zusammenfassung

Die großräumige Zirkulation im Nordatlantischen Ozean spielt durch die meridionalen Transporte von Wärme und Frischwasser eine wichtige Rolle für das Klima im nordeuropäischen Raum. Paläoklimatologische Ergebnisse und verschiedene Modellrechnungen haben auf die Möglichkeit abrupter Klimaschwankungen durch Änderungen in der Tiefenwasserbildung im subpolaren Nordatlantik und der damit verknüpften „thermohalinen“ Zirkulation hingewiesen.

Im Verständnis verschiedener Prozesse, die die Dynamik der thermohalinen Zirkulation bestimmen, bestehen allerdings noch große Lücken. Eine besondere Schwierigkeit in der Simulation von Schwankungen des Systems ist, daß wesentliche Vorgänge im Ozean auf sehr kleinen räumlichen Skalen ablaufen, die in Modellen nur mit großem Rechenaufwand darstellbar sind.

Im Vordergrund dieses Referates werden neuere Ergebnisse von hochauflösenden Modellen der nordatlantischen Zirkulation stehen, die als ein „Community Modeling Effort“ im Rahmen des „World Ocean Circulation Experiment“ durchgeführt werden. In der Reaktion des Ozeans auf Oberflächenanomalien ergibt sich dabei eine bemerkenswerte Abweichung vom Verhalten von Klimamodellen, die im Augenblick Gegenstand näherer Untersuchung ist.

## High Resolution of the Circulation in the North Atlantic (Summary)

Through the meridional transport of heat and fresh water, the large-scale circulation in the North Atlantic ocean has an important influence on the climate of northern Europe. Palaeo-climatological results and various model calculations have indicated the possibility of abrupt climatic variations as a result of changes in deep water formation in the sub-polar North Atlantic and its associated "thermohaline" circulation.

Wide gaps still exist, however, in our understanding of the various processes determining the dynamics of the thermohaline circulation. Of particular difficulty when simulating the system's variations is that crucial processes in the ocean occur on very small spatial scales. Their representation in numerical models requires a large amount of computer time.

This paper presents recent results from high-resolution models of North Atlantic circulation. The models are part of the "Community Modeling Effort" within the "World Ocean Circulation Experiment". The reaction of the ocean to surface anomalies deviates remarkably from the behaviour of climate models; this deviation is now a focus of investigation.

## 1 Einleitung:

### Schwankungen der thermohalinen Zirkulation und des Klimas

Bis vor wenigen Jahren nahm man allgemein an, daß die Rolle des Ozeans im Klimasystem eine eher passive sei: so sollte etwa die thermische Trägheit des Ozeans für eine stark verzögerte Reaktion des Klimas auf den anthropogenen Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre sorgen. An dieser Vorstellung sind in jüngster Zeit durch Modellsimulationen des Systems Atmosphäre-Ozean-Meereis und paläoklimatologische Befunde erhebliche Zweifel aufgekommen. Es stellt sich die Frage, ob die ozeanische Physik nicht unter bestimmten Bedingungen eine wesentlich aktivere Rolle spielen und zur Ursache für abrupte Klimaschwankungen werden kann.

Eine Schlüsselfunktion kommt bei diesen Überlegungen der thermohalinen Zirkulation des Ozeans zu, also der Komponente des großräumigen Strömungsfeldes, die durch den Wärme- und Wasseraustausch mit der Atmosphäre bedingt wird. Durch winterliche Abkühlung in den hohen Breiten kann dort in einzelnen Regionen das Wasser schwer genug werden, um die Stabilität der Schichtung zu durchbrechen und tiefreichende Vermischungsprozesse auszulösen. Die winterliche Konvektion und Tiefenwassererneuerung ist al-

lerdings in den einzelnen Ozeanbecken sehr verschieden ausgeprägt. Unter den heutigen klimatischen Verhältnissen dominiert die Bildung von Tiefenwasser im subarktischen Atlantik; beteiligt sind dabei Konvektionsprozesse nördlich von Island und in der Labradorsee. Die mit der Tiefenwassererneuerung verbundene Absinkbewegung führt zu einer mächtigen, den Weltozean umspannenden Umwälzbewegung, dem „great ocean conveyor“ (Broecker [1991]) (Abb. 1). Das Nordatlantische Tiefenwasser wird durch eine konzentrierte Randströmung entlang des amerikanischen Kontinentalschelfs bis in den Antarktischen Wasserring transportiert und ist, stark vermischt, bis in den Indischen und Pazifischen Ozean hinein nachweisbar. Der Export kalten Tiefenwassers aus dem Nordatlantik (in der Größenordnung von  $15 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) wird durch einen entsprechenden nordwärtigen Transport warmen Wassers in den oberen 1000 m kompensiert, der sich hier den großen windgetriebenen Wirbeln überlagert. Ausdruck dafür sind die deutliche Verstärkung des Golfstroms über den rein windgetriebenen Anteil (Schmitz and Richardson [1991]) und die Ausbildung des Nordatlantischen Stroms, der durch Transport von Wärme in die hohen Breiten des Nordostatlantiks die klimatische Vorzugsstellung von Nordwesteuropa begründet.

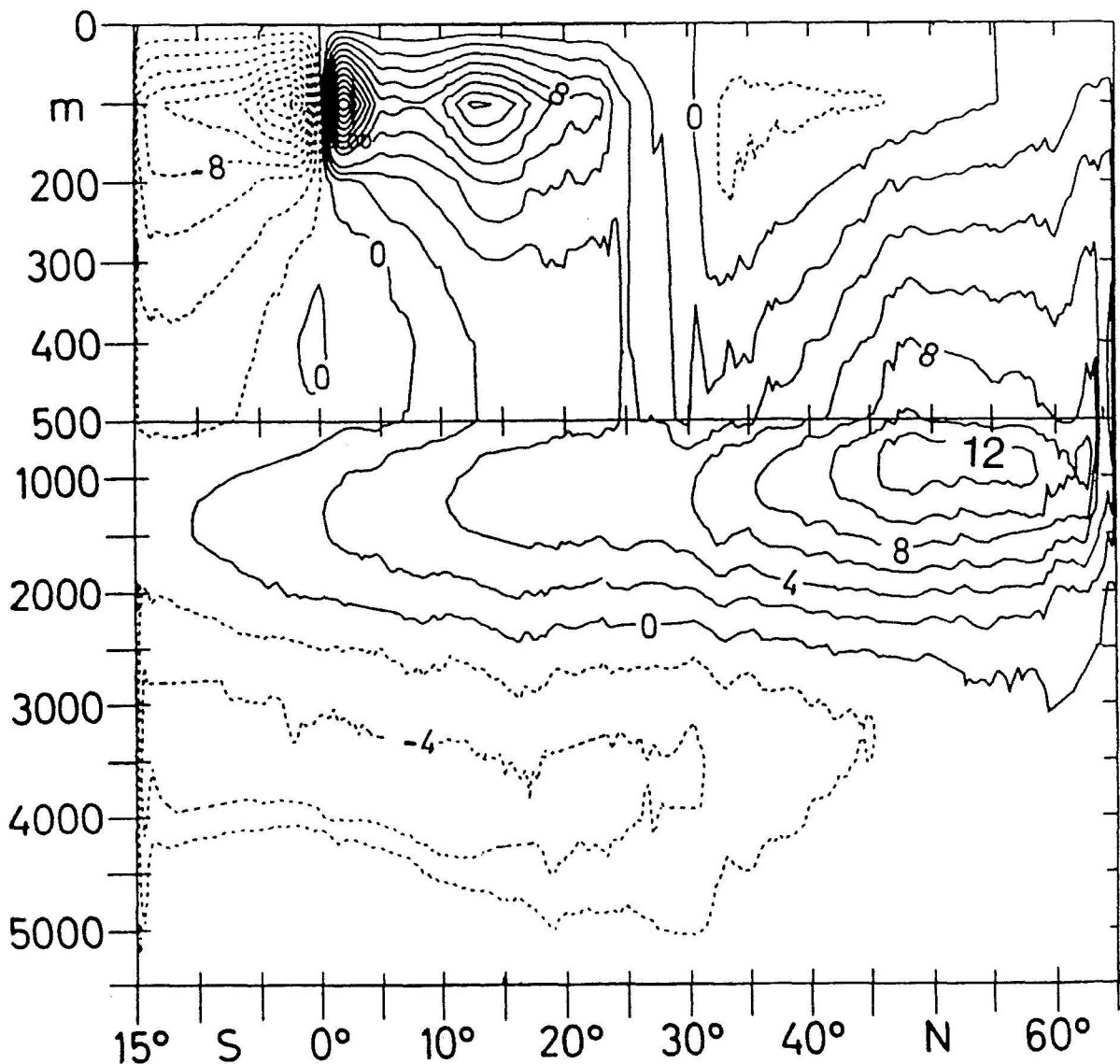


Abb. 1 Stromlinien des zonal integrierten Massentransports in Sv ( $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) in einem Modellauf mit der Kieler CME-Version; horizontale Auflösung des Modellaufs  $1/3^\circ$  (meridional) und  $0,4^\circ$  (zonal); vertikale Auflösung: 30 Tiefenniveaus. In dieser Modelllösung sinken 12 Sv nördlich von  $55^\circ \text{ N}$  ab und strömen zwischen 1000 m und 3000 m Tiefe äquatorwärts. Das Modellgebiet umfaßt den Atlantik zwischen  $15^\circ \text{ S}$  und  $65^\circ \text{ N}$ .

Die durch Untersuchungen an Bohrkernen aus dem Grönlandeis und ozeanischen Sedimenten erhaltenen Einblicke in die zeitliche Entwicklung klimatischer Parameter lieferten in den vergangenen Jahren Hinweise dafür, daß diese uns heute bekannte Struktur der nordatlantischen Zirkulation offenbar nicht immer Bestand hatte. Nach den mittels radiochemischer Methoden aus den Eisbohrkernen abgeleiteten Zeitreihen der Lufttemperatur ist die Klimaentwicklung während des letzten Glazials und des vorangegangenen Interglazials durch eine Serie abrupter Schwankungen gekennzeichnet (GRIP [1993]). Die Übergänge zwischen verschiedenen Klimazuständen erfolgten dabei im Zeitraum weniger Jahrzehnte. Paläo-ozeanographische Befunde (Lehman und Keigwin [1992]) sprechen dafür, daß diese Klimaschwankungen einhergingen mit tiefgreifenden Änderungen der Tiefenwassererneuerung und -umwälzung im Nordatlantik. Offenbar kann die thermohaline Zirkulation in mehr als einem Gleichgewichtszustand operieren: neben dem heutigen in weiteren, in denen eine geringere oder keine Tiefenwassererneuerung erfolgt, damit auch keine Umwälzbewegung und kein ozeanischer Transport von Wärme in den nordatlantischen Raum.

Der physikalische Grund für die Möglichkeit von Instabilitäten der thermohalinen Zirkulation liegt darin, daß die Dichte des Meerwassers eine Funktion von Temperatur und Salzgehalt ist. Ursache für die Umwälzbewegung ist der meridionale Dichtekontrast, der der Meeresoberfläche durch die atmosphärischen Flüsse aufgeprägt wird. Dabei ist eine Voraussetzung für das Auftreten tiefreichender Vertikalkonvektion in den hohen Breiten, daß der lokale Oberflächensalzgehalt genügend hoch ist: bereits eine geringe Erniedrigung kann dazu führen, daß selbst bei einer winterlichen Abkühlung bis zum Gefrierpunkt die Oberflächendichte nicht mehr groß genug wird, um instabile Verhältnisse und damit Konvektion zu erzeugen. Während die Erwärmung in den niederen und Abkühlung in den höheren Breiten für die Aufrechterhaltung des meridionalen Dichtekontrastes sorgt, wirkt dem der Wasseraustausch mit der Atmosphäre entgegen. Durch den Niederschlagsüberschuß in den höheren Breiten würde eine kontinuierliche Aussüßung erfolgen – wenn nicht durch die Umwälzbewegung ständig salzreiches Oberflächenwasser aus den Subtropen nachgeführt würde. Mit anderen Worten: eine Bedingung für die thermohaline Umwälzung, ein ausreichender Salzgehalt für das Entstehen genügend dichten Wassers bei winterlicher Abkühlung im subpolaren Nordatlantik, wird durch die thermohaline Umwälzung selbst aufrechterhalten. Dieser Umstand stellt gewissermaßen eine „Achillesferse“ des ozeanischen conveyor belts dar (Broecker [1991]); er macht die Umwälzbewegung potentiell anfällig für kleine Störungen. In den letzten Jahren konnten durch verschiedene, allerdings meist stark idealisierte Modellrechnungen Einblicke in die Rolle der prinzipiellen Rückkopplungseffekte in diesem System gewonnen werden (Willebrand [1993]). Ein tiefergehendes Verständnis der Dynamik der Zirkulation steht aber nach wie vor aus: erforderlich sind Modelluntersuchungen, die die atmosphärischen und ozeanischen Prozesse in ihrer komplexen Wechselwirkung untereinander in realistischer Weise darzustellen vermögen.

## 2 Untersuchungen mit hochauflösenden Modellen

Eine besondere Schwierigkeit bei der Simulation des Systems ist die Tatsache, daß wesentliche Prozesse im Ozean auf relativ kleinen räumlichen Skalen ablaufen: Meeresströmungen wie der Golfstrom oder der Nordatlantische Strom östlich von Neufundland sind nur 50 bis 100 km breit; Momentaufnahmen der Strömungsverteilung sind durch intensive Wirbel mit ähnlichen Ausdehnungen gekennzeichnet (Abb. 2); tiefreichende winterliche Konvektion tritt ebenfalls nur in eng begrenzten Gebieten auf, wie etwa im Zentrum der Labradorsee (Clarke und Gascard [1983]). Eine Auflösung dieser Skalen in Modellen, die das gekoppelte System Atmosphäre-Ozean-Meereis beschreiben, ist rechentechnisch nicht durchführbar. Klimamodelle, die sich mit einer Auflösung von 400–500 km für den Ozean begnügen müssen, können die ozeanischen Prozesse daher nur in starker Näherung darstellen. Auf der anderen Seite sind in den vergangenen Jahren Modelle zur Simulation des Ozeans entwickelt worden, mit denen – unter Verzicht auf eine interaktive Kopplung mit der Atmosphäre – Auflösungen von bis etwa 20 km erreichbar sind. Eine Serie solcher Experimente ist in den letzten Jahren als „Community Modeling Effort“ im Rahmen des World Ocean Circulation Experiments (WOCE) durchgeführt worden. Die von Arbeitsgruppen am National Center for Atmospheric Research in Boulder, USA und in der Abteilung für Theoretische Ozeanographie des IFM Kiel durchgeführten Modellrechnungen umfassen den Atlantischen Ozean zwischen 15° S und 65° N; der Ein- und Ausstrom über die offenen Modellgrenzen im Norden und Süden wird durch entsprechende Randbedingungen simuliert.

Während der Schwerpunkt der hochauflösenden Modelluntersuchungen zunächst auf Fragen der windgetriebenen Zirkulation im tropischen und subtropischen Atlantik (Bryan und Holland [1989]; Böning et al. [1991]; Schott und Böning [1991]; Böning und Herrmann [1994]) und der Rolle der Wirbel lag (Treguier [1992]; Stammer und Böning [1992]; Beckmann et al. [1994 a,b]), rückte in jüngster Zeit die thermohaline Zirkulation verstärkt in den Mittelpunkt (Holland und Bryan [1993]; Böning et al. [1994 a,b]). Hinsichtlich einer eingehenderen Beschreibung des CME-Modells und der Vielzahl der durchgeführten Experimente sei auf die oben genannten Artikel verwiesen. Im folgenden soll auf die Problematik der Tiefenwasserbildung und Umwälzbewegung im Nordatlantik eingegangen werden und ein überraschendes Resultat der hochauflösenden Modellrechnungen vorgestellt werden.

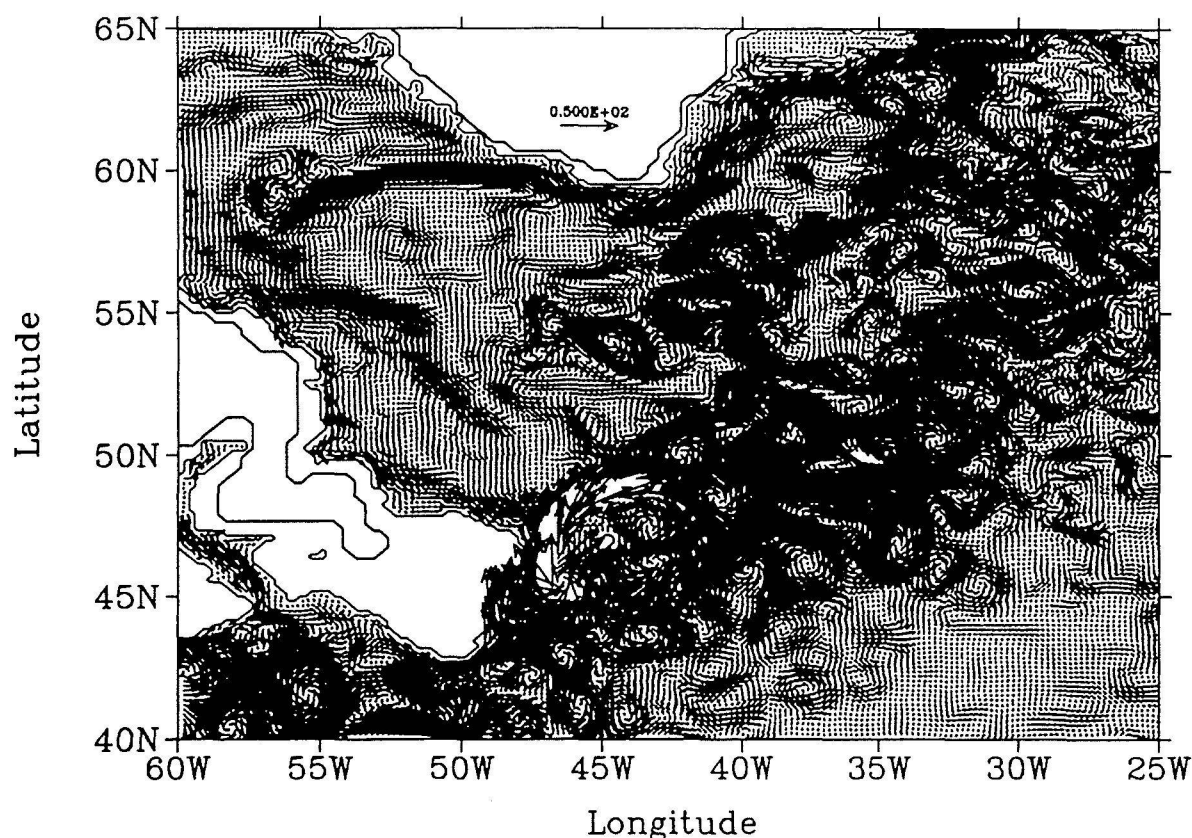


Abb. 2 Momentaufnahme des oberflächennahen Strömungsfeldes im subpolaren Nordatlantik (90 mTiefe) in einer sehr hochauflösenden Version ( $1/6^\circ \times 0,2^\circ$ ) des CME-Modells (aus Böning et al. [1994b]).

### 3 Vertikalkonvektion und Absinkbewegung im subpolaren Nordatlantik

Die gegenwärtige Vorstellung über die Tiefenwasserausbreitung im subpolaren Nordatlantik beruht im wesentlichen auf Wassermassenanalysen und nur wenigen direkten Strömungsmessungen. Die Quellregionen für die dichtesten Anteile des Nordatlantischen Tiefenwassers sind winterliche Konvektionsgebiete im Seegebiet nördlich Islands und in der Norwegensee. Die mit diesen sehr kalten und schweren Wassermassen gespeisten „Overflows“ des Grönland-Island-Schottland Rückens haben eine Größenordnung von insgesamt 5–6 Sv ( $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ); dies entspricht etwa einem Drittel der meridionalen Umwälzbewegung im Atlantischen Ozean. Welche Prozesse, in welchen Gebieten im subpolaren Nordatlantik südlich



des Rückens zur Umwälzbewegung beitragen, ist weitgehend unklar. Eine wichtige Rolle könnten turbulente Vermischungsprozesse („entrainment“) in den Dichtegefällsströmungen unmittelbar südlich des Rückens spielen. Strömungsmessungen im tiefen Randstrom am grönländischen Kontinentalabhang ergaben einen raschen Anstieg des Gesamttransports von Tiefenwasser bis auf etwa 13 Sv bei Kap Farewell (Dickson et al. [1991]; Clarke [1984]). Eine offene Frage ist, welche Rolle die tiefe winterliche Konvektion in der Labradorsee für die Gesamtzirkulation spielt. Die Bildung des Labradorseewassers ist durch starke Abhängigkeit vom Oberflächensalzgehalt großen Schwankungen unterworfen, blieb z.B. während der „Großen Salzgehaltsanomalie“ völlig aus (Dickson et al. [1988]; Lazier [1988]). Ob dies aber einen dynamischen Effekt hat und den Transport des atlantischen „conveyors“ berührt, ist nicht bekannt.

Abbildung 3 zeigt die, mit dem hochauflösenden CME-Modell berechnete, winterliche Temperaturverteilung im subpolaren Nordatlantik. Ähnlich wie in den Beobachtungen findet sich das kälteste Oberflächenwasser, mit Temperaturen unter 3 °C, im Zentrum der Labradorsee. Die hier erfolgende Labilisierung der Dichteschichtung resultiert in einer bis über 2000 m tief reichenden, vertikalen Durchmischung der Wassersäule. Die T-S Eigenschaften und das Volumen des homogenisierten Wassers entsprechen dabei in guter Näherung den beobachteten Eigenschaften in Wintern mit aktiver Konvektion; die Menge des homogenisierten Wassers entspricht einer äquivalenten Jahresproduktion von 4–5 Sv.

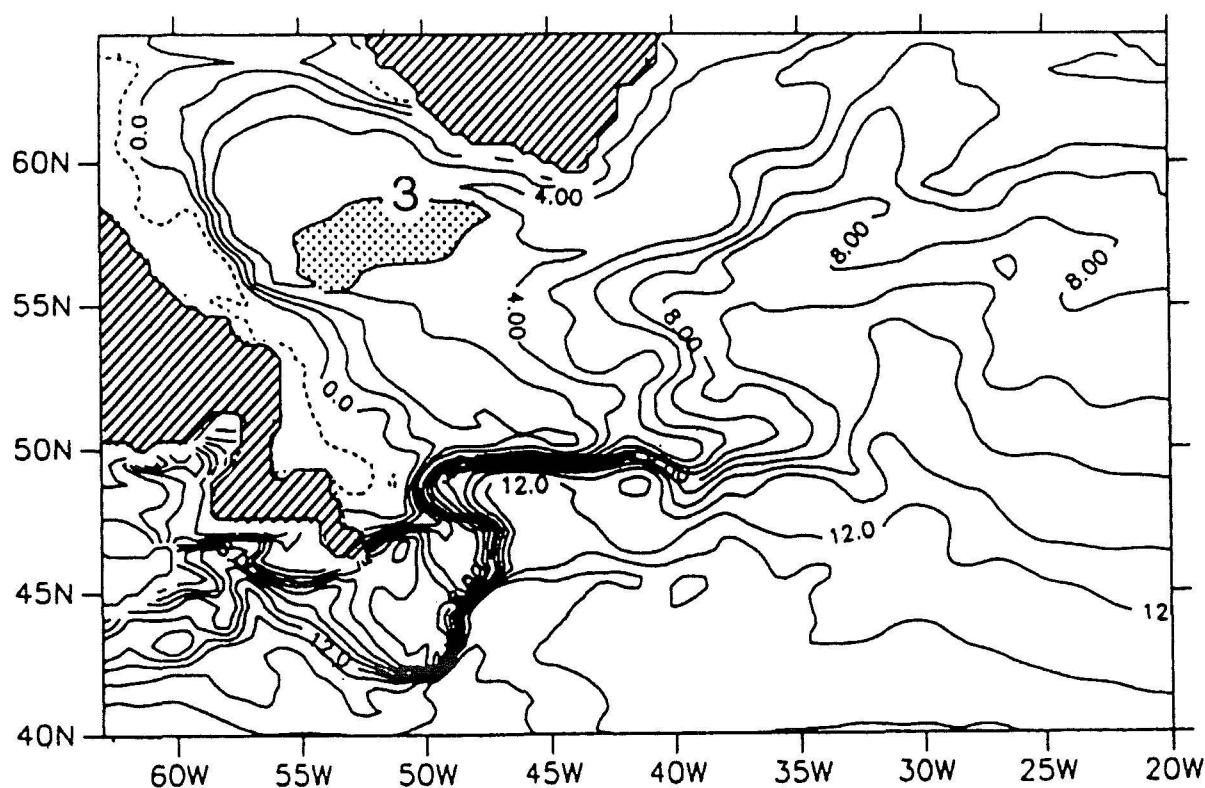


Abb. 3a Verteilung der mittleren potentiellen Temperatur im CME-Modell für den subpolaren Nordatlantik im Winter an der Oberfläche

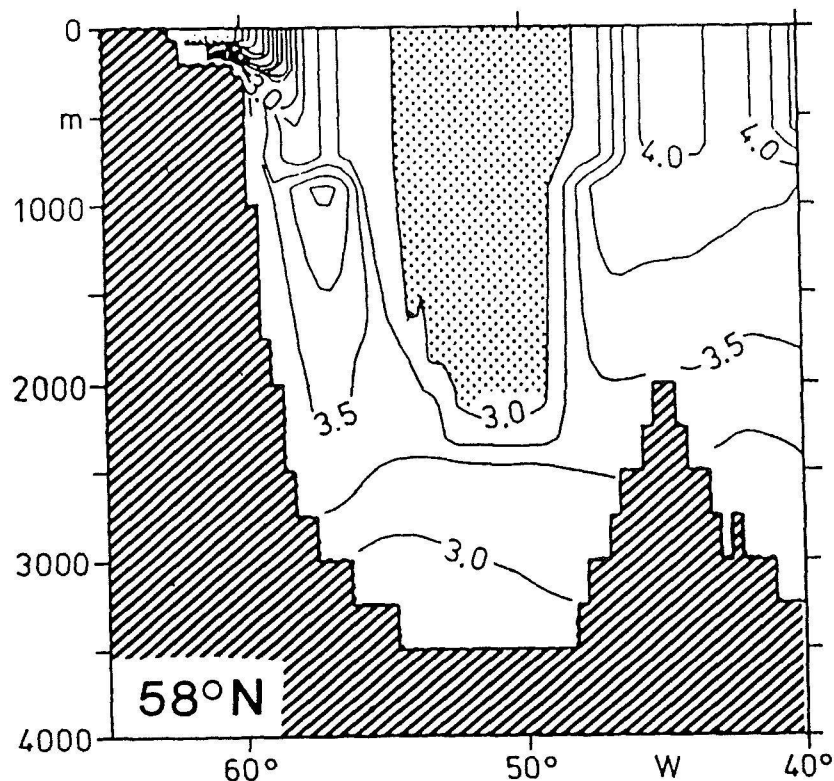


Abb. 3b Verteilung der mittleren potentiellen Temperatur im CME-Modell für den subpolaren Nordatlantik im Winter längs 58° N

Bemerkenswert an den Modelllösungen ist aber nun, daß die Konvektionsaktivität in der Labradorsee mit keinem nennenswerten Effekt auf den Tiefenwassertransport verbunden ist. Analysen der vertikalen Massentransporte in 1000 m Tiefe zeigen, daß die Absinkbewegungen, die den südwardigen Transport von Tiefenwasser speisen, vornehmlich auf die Randstromregionen des Irminger- und Islandbeckens konzentriert sind, Regionen also, in denen keine tiefreichende Vermischung von der Oberfläche aus erfolgt. Der Beitrag zum tiefen Randstrom durch Absinkbewegungen in der Labradorsee ist dagegen in allen CME-Experimenten geringer als 1 Sv (Abb. 4).

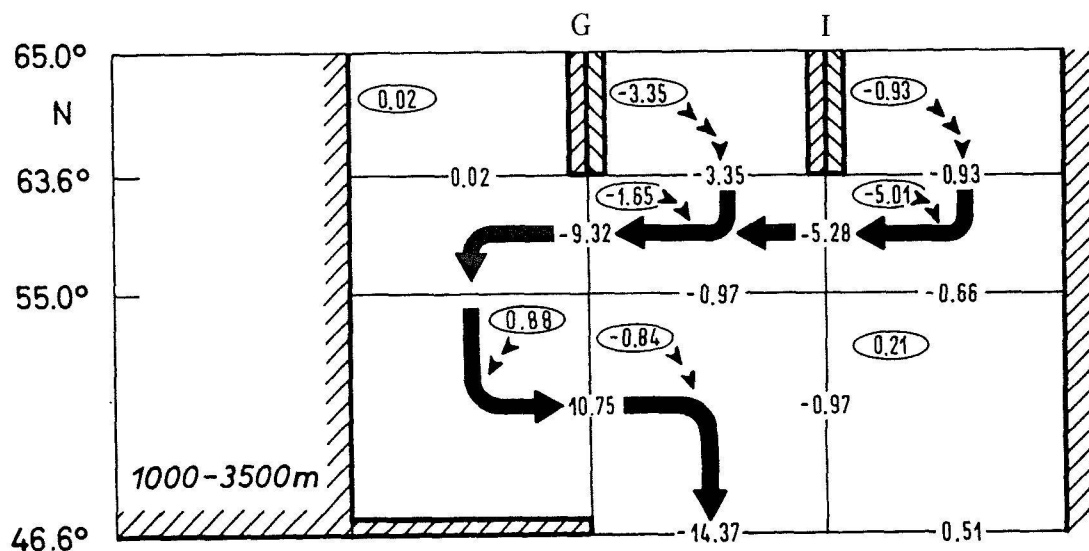


Abb. 4 Schematische Darstellung der Transportwege des Nordatlantischen Tiefenwassers in der 1/3° Version des CME-Modells mit klimatologischen Antriebsfeldern. Transportwerte in Sv. Angegeben ist der horizontale Massentransport zwischen 1000 und 3500 m und die Absinkrate in 1000 m Tiefe. G = Grönland; I = Island.

#### 4 Reaktion auf Änderungen der atmosphärischen Flüsse

Der relativ geringe Beitrag der Konvektionsprozesse in der Labradorsee hat wichtige Folgen für die Reaktion der thermohalinen Zirkulation auf Änderungen in den atmosphärischen Flüssen. Eine Reihe von Sensitivitätsexperimenten mit einer Modellversion mit horizontaler Auflösung von  $1^\circ$  zeigte, daß eine Abschwächung der Konvektionsaktivität durch künstliche Reduktion des Oberflächensalzgehalts oder Verminderung der winterlichen Wärmeverluste über der Labradorsee zwar zu spürbaren Effekten in den hydrographischen Eigenschaften des oberen Stockwerks des Nordatlantischen Tiefenwassers führt, aber mit keiner nennenswerten Änderung des Tiefenwassertransports und meridionalen Umwälzung verbunden ist (Döscher [1994]). Der meridionale Massentransport ist im wesentlichen bestimmt durch die Bedingungen am Nordrand des Modellgebiets, d.h. den Bedingungen im Overflow-Bereich. Obwohl der Ausstrom selbst nur zu etwa einem Drittel der Gesamtproduktion von Tiefenwasser beiträgt, beeinflußt er offenbar die Prozesse im subpolaren Nordatlantik in maßgebender Weise.

Die Ergebnisse des hochauflösenden CME-Modells scheinen in Widerspruch zu stehen zu dem Verhalten einer Reihe von Klimamodellen. Sowohl in dem grobauflösenden, globalen Ozeanmodell von Weisse et al. [1993] als auch dem gekoppelten Ozean-Atmosphäre Modell von Delworth et al. [1993] zeigt sich eine dynamische Wechselbeziehung zwischen  $T$  und  $S$  Anomalien in der Labradorsee und der Stärke der meridionalen Umwälzbewegung im Nordatlantik, die sich in Oszillationen auf dekadischer Zeitskala ausdrücken. Die Ursache für das abweichende Verhalten im CME-Modell ist nicht abschließend geklärt; eine wichtige Rolle könnte spielen, daß in den hochauflösenden Modellrechnungen die Konvektionsregion in der zentralen Labradorsee getrennt wird von dem tiefen, das Becken zyklonal umströmenden Randstrom; die konvektive Erneuerung des Labradorseewassers erfolgt daher in einem Bereich stagnierender Strömung und hat keinen unmittelbaren Effekt auf den Tiefenwassertransport.

#### 5 Schlußfolgerungen

Das sehr von dem Verhalten grobauflösender Klimamodelle abweichende Ergebnis der CME-Simulationen hinsichtlich der Rolle der Labradorsee zeigt, daß zum Verständnis der Dynamik der thermohalinen Zirkulation und damit der Rolle des Ozeans bei Klimaschwankungen nicht auf die Entwicklung ozeanischer Modelle verzichtet werden kann, die eine realistische Simulation der wesentlichen Strömungsstrukturen und Prozesse erlauben. Wegen ihres großen Einflusses auf die beckenweite Zirkulation wird ein Schwergewicht der Forschung auf einer verbesserten Simulation der Überströmungs- und Entrainmentprozesse im Bereich des Grönland-Schottland Rückens liegen müssen, die in bisherigen Zirkulationsmodellen in sehr unbefriedigender Weise dargestellt werden.

#### Literatur

- Beckmann, A., C.W. Böning, C. Köberle, and J. Willebrand, 1994 a: Effects of increased horizontal resolution in a simulation of the North Atlantic Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **24**, 326–344.
- Beckmann, A., C.W. Böning, B. Brügge, and D. Stammer, 1994 b: On the generation and role of eddy variability in the central North Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.* (In press).
- Böning, C.W., R. Döscher, and R.G. Budich, 1991: Seasonal transport variation in the western subtropical North Atlantic: Experiments with an eddy-resolving model. *J. Phys. Oceanogr.*, **21**, 1271–1289.
- Böning, C.W., and P. Herrmann, 1994: Annual cycle of poleward heat transport in the ocean: Results from high-resolution modeling of the North and Equatorial Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.*, **24**, 91–107.
- Böning, C.W., W.R. Holland, F.O. Bryan, G. Danabasoglu, J.C. McWilliams, 1994a: An overlooked problem in model simulations of the thermohaline circulation and heat transport in the Atlantic Ocean. *J. Climate* (In press).
- Böning, C.W., F.O. Bryan, W.R. Holland, and R. Döscher, 1994b: Thermohaline circulation and poleward heat transport in a high-resolution model of the North Atlantic (In prep.).
- Broecker, W. G., 1991: The great ocean conveyor. *Oceanography*, **4**, 79–89.
- Bryan, F.O., and W.R. Holland, 1989: A high resolution simulation of the wind- and thermohaline-driven circulation in the North Atlantic Ocean. In: Parameterization of small-scale processes. Proceedings 'aha huli'ko'a, Hawaiian Winter Workshop, University of Hawaii, 99–115.

- Clarke, A., 1984: Transport through the Cape Farewell-Flemish Cap section. *Rapp. P. v. Reun. Cons. int. Explor. Met.*, **185**, 120-130.
- Clarke, A. and J.C. Gascard, 1983: The formation of Labrador Sea Water: Part I, Large scale processes. *J. Phys. Oceanogr.*, **13**, 1764-1778.
- Delworth, T., S. Manabe, and R.J. Stouffer, 1993: Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Climate*, **6**, 1993-2011.
- Dickson, R.R., E.M. Gmitrowicz, and A.J. Watson, 1991: Deep-water renewal in the northern North Atlantic. *Nature*, **344**, 848-850.
- Döscher, R., C.W. Böning, and P. Herrmann, 1994: Response of meridional overturning and heat transport in the North Atlantic to changes in thermohaline forcing in northern latitudes: a model study. *J. Phys. Oceanogr.* (In press).
- Greenland Ice-core Project (GRIP) Members, 1993: Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature*, **364**, 203-207.
- Holland, W.R. and F.O. Bryan, 1993: Sensitivity studies on the role of the ocean in climate change. In: *Ocean Processes and Climate Dynamics: Global and Mediterranean Examples*. P. Malanotte-Rizzoli and A.R. Robinson (Hrsg.), NATO ASI Proceedings, Kluwer Publ. Co.
- Lazier, J.R.N., 1988: Temperature and salinity changes in the deep Labrador Sea, 1962-1986. *dsr*, **35**, 1247-1253.
- Schott, F.A., and C.W. Böning, 1991: Evaluation of the WOCE model in the western equatorial Atlantic: Upper-layer circulation. *J. Geophys. Res.*, **96**, 6993-7004.
- Stammer, S., and C.W. Böning, 1992: Mesoscale variability in the Atlantic Ocean from GEOSAT altimeter and WOCE high resolution numerical modelling effort. *J. Phys. Oceanogr.*, **22**, 732-752.
- Treguier, A.M. 1992: Kinetic energy analysis of an eddy-resolving, primitive equation model of the North Atlantic. *J. Geophys. Res.*, **97**, 687-701.
- Weisse, R., U. Mikolajewicz, and E. Maier-Reimer, 1994: Decadal variability of the North Atlantic in an ocean general circulation model. *Max-Planck Institute for Meteorology, Rep. No. 108*, 35 pp.
- Willebrand, J., 1993: Forcing the ocean with heat and freshwater fluxes. In: *Energy and Water Cycles in the Climate System*, E. Raschke (Hrsg.); Berlin: Springer, 215-233.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Claus W. Böning  
Institut für Meereskunde  
an der Universität Kiel  
Düsternbrocker Weg 20  
24105 Kiel